

既設トンネルの補強技術の開発

独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ 主任研究員 石村 利明

1. はじめに

トンネル覆工の変状原因は、大きくは過大な土圧の作用とコンクリート覆工の材料劣化に大別され、変状対策として用いられる補修・補強工の適用性や効果も発生原因によって異なる。過大な土圧によって変状が発生したトンネルに対しては、耐荷力を強化することを目的とした各種の補強対策が実施されているが、内空断面に余裕が無い場合に圧縮力に対しても十分な補強効果が期待できる補強対策がないのが現状である。そこで、民提案型による共同研究を行い、内空断面に余裕が無い場合でも圧縮力に対して十分な耐荷力が確保できる補強技術の開発を行った。

2. 補強技術の開発

トンネルの内空断面に余裕がない場合でも十分な耐荷力が確保できる補強技術を開発することを目的として、共同研究により4種類の内面補強工の開発を行った。今回、提案する各補強工については、载荷パターンを想定した実物大のトンネル覆工载荷実験を行い、その耐荷力および破壊形態を明らかにすることでその補強効果を把握した。実物大のトンネル覆工载荷実験の概要および新たな補強工の概要は以下に示すとおりである。

2.1 覆工载荷実験の概要

損傷した覆工の内面に補強工を施した場合の複合構造の破壊形態および耐荷力を調べる目的で、実大規模の覆工载荷実験を実施した(写真-1)。ここで、覆工コンクリート供試体(呼び配合 18-12-40-N)の寸法は、二車線道路トンネル断面(上半)の覆工と同じ寸法規模とし、外径9.7m、覆工厚30cmとし、これを水平置き(トンネル軸方向長さ1.0m)にして载荷した。



写真-1 覆工载荷実験

実験の作用荷重は、トンネル上方の地山が緩んで、ある高さ相当の地山重量がトンネル覆工天端に直接に荷重として作用する、いわゆる典型的な緩み土圧を想定した荷重形式とした(図-1)。覆工の損傷の模擬と実験手順については、無垢の覆工供試体にひび割れや圧壊が発生するまで载荷を行い、载荷荷重が最大荷重の約95%荷重時まで低下した状態を損傷供試体とした(損傷载荷)。

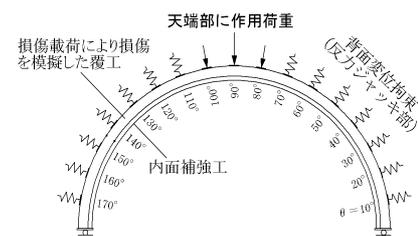


図-1 作用荷重の概念図

次に、損傷载荷終了時荷重を一旦除荷して、覆工供試体の内面へ補強工を施し、再度、損傷载荷と同じ载荷形式で载荷を行い最終破壊まで载荷した(補強後载荷)。

2.2 内面補強工の概要と補強効果

2.2.1 連続繊維メッシュ入り短繊維混入モルタル内巻き工

(1)工法の概要および仕様

本工法は、本工法は、内巻き補強材として、圧縮強度とじん性に優れた短繊維混入モルタル

ルと、引張補強材として連続繊維メッシュ（使用材料例： $t=1.5\text{mm}$ 、引張強度 $88\text{N}/\text{mm}^2$ ）を組み合わせた工法である（図-2）。補強厚は、 $t=50\sim 100\text{mm}$ を標準とする。短繊維混入（PVA 繊維、標準的な混入率 $2\%\text{vol}$ ）モルタルは、圧縮強度 $40\sim 60\text{N}/\text{mm}^2$ で、薄肉の狭い部分に現場打ちすることから自己充填可能な高流動とした。連続繊維メッシュは、短繊維混入モルタル部の内面側および外面側（既設覆工内面側）に配置した。

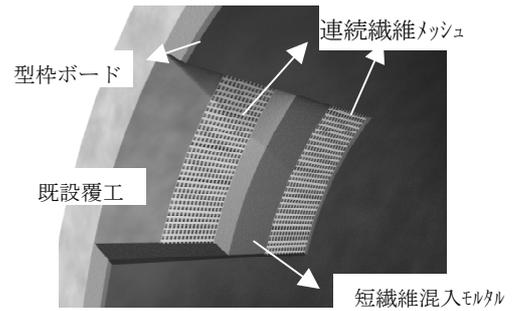


図-2 連続繊維メッシュ入り短繊維混入モルタル内巻き工の概要図

(2) 実験結果

連続繊維メッシュを使用した短繊維補強モルタルを 75mm 内巻き補強（圧縮強度 $50\text{N}/\text{mm}^2$ ）して実験を行った。図-3 に示すように、最終的には天端付近の既設コンクリート（無筋）に圧縮破壊が発生し、荷重が低下して終了した。内巻き補強後の最大荷重は、損傷荷重の最大荷重を上回ったことから、既設コンクリート 300mm の耐荷力に対して繊維補強モルタルの内巻き補強による耐荷力の向上が確認できた。

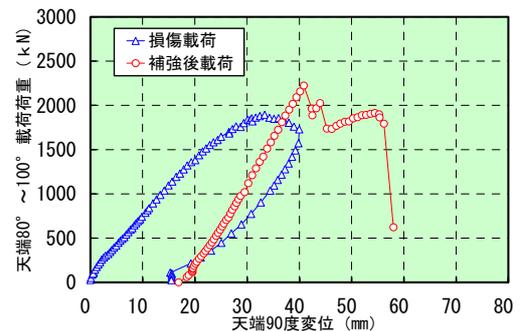


図-3 荷重試験結果

(3) 施工方法等

施工に際しては、同じ短繊維混入モルタルで作成された型枠ボード ($t=5.5\text{mm}$) を既設覆工からアンカーなどで固定して、モルタル注入する。作業は、特殊な機械やプロテクターなどを必要とせず、省スペースで行うことができるため、道路トンネルの片線規制での施工が可能である。

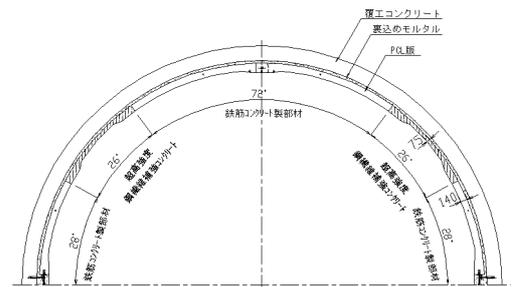


図-4 部分薄肉PCL版設置工の概要

2.2.2 部分薄肉PCL版設置工

(1) 工法の概要および仕様

既設トンネルの補強工の現行の一工法にPCL（プレキャスト・コンクリート・ライニング）工法があるが、トンネル内空断面（建築限界）に余裕がない場合には、従来のPCL工法を適用すると建築限界が確保できないため盤下げなどの併用が必要であった。そこで、建築限界を侵す可能性の高いトンネル肩部のみを薄肉化したPCL版を開発した（図-4）。肩部の薄肉化した部分のPCL版は、鉄筋入りの超高強度鋼繊維補強コンクリートである。肩部以外は、従来のPCL版で、RC部材（コンクリート圧縮強度 $40\text{N}/\text{mm}^2$ ）である。部材厚は薄肉部で $t=75\text{mm}$ 、他部で $t=140\text{mm}$ で、背面に $t=50\text{mm}$ の裏込めモルタル工（セメントと砂の質量比 $C:S=1:2$ ）を実施するため、出来形は薄肉部で $t=125\text{mm}$ 、他部で $t=190\text{mm}$ となる。

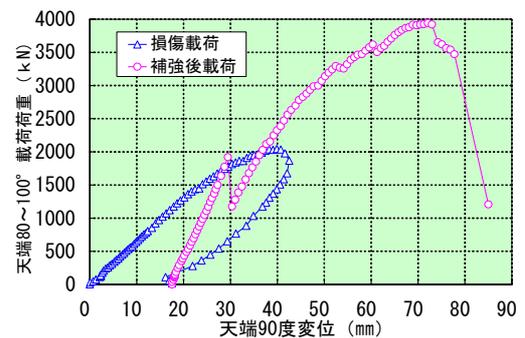


図-5 荷重変位曲線

(2)実験結果

山岳トンネルにおいて覆工に緩み荷重が作用した場合を想定して行った実験では、薄肉部を有する PCL 版で補強したトンネルは、 $t=125\text{mm}$ 厚の無筋コンクリートで補強したトンネルに対して 約 1.5 倍の耐力を有していることが確認できた (図-5)。

(3)施工方法等

本 PCL 版の架設は通常の PCL 版と同様な方法で行う。これらの方法は、一般交通車両の規制条件、施工性、経済性を総合的に判断して決定する必要がある。また、PCL 版は、供用時の荷重条件の他、施工時荷重条件下で部材が決定する場合があるので留意が必要である。

2.2.3 エキスパンドメタルまたは鋼板入り ECC 吹付け工

(1)工法の概要および仕様

本工法は、覆工内面にエキスパンドメタルを設置したのち高靱性繊維混入セメント (ECC : Engineered Cementitious Composites) を吹付ける工法である (図-6)。吹付け厚は $t=50\sim 70\text{mm}$ を標準とする。既設覆工にひび割れ・亀裂等の弱面が存在する場合には、予め局所的に鋼板接着による補強を施したのちに本工法を適用することも可能である。ECC (PVA 繊維の混入率 2%vol.) の力学特性は、圧縮強度 30N/mm^2 以上、引張強度 2N/mm^2 以上であり、鋼材降伏ひずみの 10 倍程度 (約 2%) に相当する引張りひずみが作用しても引張力を保持する特徴をもつことから変形追従性に優れるとともに、繊維架橋効果によってひび割れ発生後の剥離・剥落も防止する。さらに中性化、塩害、凍害などに対しても耐久性に優れるため長期的な補強効果が期待できる。

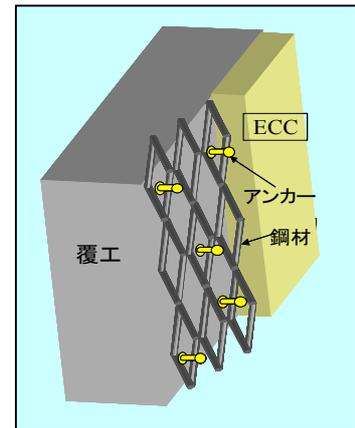


図-6 本工法概要図

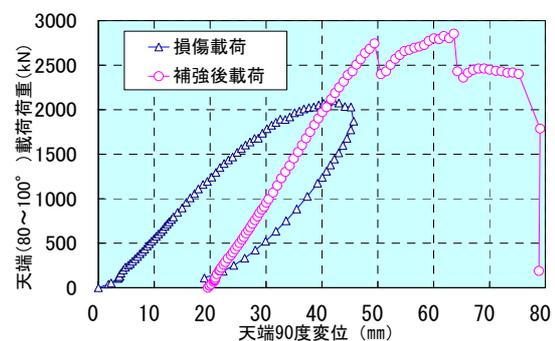


図-7 荷重変位曲線

(2)実験結果

天端ゆるみ荷重をモデル化した実大載荷実験を行った結果、損傷を受けた覆工に本工法 (厚さ 50mm) を適用することで、損傷を受ける前の覆工 (厚さ 300mm , 圧縮強度 18N/mm^2) と比較して、耐力が約 1.4 倍向上することを確認した (図-7)。

(3)施工方法等

ECC の材料はプレミックスされており、練混ぜも汎用的な小型ミキサで可能なため、小断面トンネルでの施工も容易である。また、本工法は吹付け工法であることから、型枠および納期を有する加工資材も不要で、かつ大型重機も使用しないため、工期短縮と工費削減が期待される。

2.2.4 ポリオレフィン短繊維混入コンクリート吹付け工

(1)工法の概要および仕様

本工法は、覆工表面に繊維混入コンクリートを吹付ける工法である (図-8)。混入する繊維はポリプロピレン (ポリオレフィン) 短繊維で、繊維の凹凸形状により繊維とセメントの付着性の向上

を図ったものである。

本工法は、覆工表面に繊維混入コンクリートを吹付ける工法である（図-8）。混入する繊維はポリプロピレン（ポリオレフィン）短繊維で、繊維の凹凸形状により繊維とセメントの付着性の向上を図ったものである。補強厚は、 $t=125\text{mm}$ を標準とする。繊維混入コンクリート（繊維の混入率 $0.3\% \text{vol.}$ ）は、圧縮強度約 $40\sim 60\text{N/mm}^2$ 、曲げ強度約 4N/mm^2 である。吹付けに際しては、吹付けコンクリートの付着を良好にする目的で溶接金網またはメッシュ鉄筋を覆工表面に取り付ける。吹付け工法のため、型枠は不要となる。

(2) 実験結果

天端外面及び両肩部内面に圧壊を生じた覆工を本工法（補強厚 $t=150\text{mm}$ ）で補強した場合の耐荷力は、無垢の覆工の耐荷力の約2倍となった（図-9）。最終破壊は、天端外面の覆工コンクリートの圧壊による剥落により生じ、天端、両肩部内面の繊維混入吹付けコンクリートには浮き上がりが生じたものの剥落には至らなかった。

(3) 施工方法等

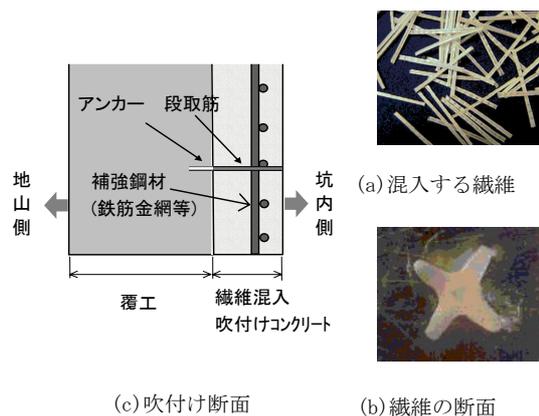
既設トンネル内一部を本工法で補強する場合、既設トンネル内の供用を維持した状態での実施を前提とすると、一般車両を防護するためのプロテクター設置が必要となる。また、本工法では耐荷力に影響を及ぼす吹付け厚さの適切な施工管理に十分配慮する必要がある。

3. 結論

開発した4工法の耐荷力について、実大規模の覆工載荷実験よりトンネル上方の地山が緩んで、ある高さ相当の地山重量がトンネル覆工天端に直接に荷重として作用する、いわゆる典型的な緩み土圧を想定した載荷形式に対しては、いずれの工法も無垢の覆工の耐荷力以上が得られることが分かった。

4. 今後の問題点

今後、外力作用によって変状したトンネルに対して、今回開発した補強工を適用可能な条件下で適用を行い、実現場での補強工の補強効果の確認を行うとともに、耐久性についての確認を行っていくことが重要である。ただし、トンネル覆工の全周に等方的に等荷重が作用する場合を想定した載荷形式に対する実験では、いずれの工法も無垢の覆工の耐荷力までの耐荷力が得られなかったことから、このような外力作用の場合には補強厚を厚くするか、または別の補強工を併用する必要がある。



(a) 混入する繊維 (b) 繊維の断面 (c) 吹付け断面

図-8 工法概要図

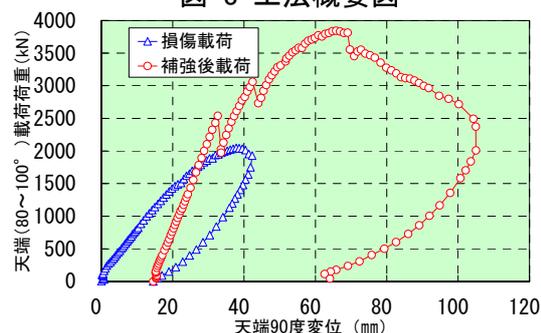


図-9 荷重変位曲線

本成果は、①連続繊維メッシュ入り短繊維混入モルタル内巻き工は、鉄建建設(株)・(株)クラレ、②部分薄肉PCL版設置工は石川島建材工業(株)・日本コンクリート工業(株)・日本サミコン(株)・ジオスター(株)、③エキスパンドメタルまたは鋼板入りECC吹付け工は鹿島建設(株)、④ポリオレフィン短繊維混入コンクリート吹付け工は、戸田建設(株)・西松建設(株)の各社と独立行政法人土木研究所との共同研究で実施したものである。